



PEM yakıt pillerinde PSO tabanlı PI ve FOPI kontrollü DC/DC dönüştürücülerine ilişkin performansların karşılaştırılması

Comparison of performances of PSO-based PI and FOPI controlled DC/DC converters in PEM fuel cells

Büşra Nur Uçmaz¹, Yurdağül Benteşen Yakut^{2*}

¹ Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, ucmazbusranur@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9457-6745>

² Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, bentesen@dicle.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3236-213X>

MAKALE BİLGİLERİ	ÖZ
<p><i>Makale Geçmişi:</i></p> <p>Geliş 10 Ekim 2023 Revizyon 25 Ekim 2023 Kabul 26 Kasım 2023 Online 29 Mart 2024</p> <p><i>Anahtar Kelimeler:</i></p> <p>PEMFC, Performans, PSO, PI kontrolör, FOPI</p>	<p>Bu çalışmada, Simulink PEMFC modelinin performansını iyileştirmek amacıyla geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI olmak üzere üç farklı uygulama ile yükseltici DC/DC (boost) kontrolör geliştirilmiş ve yöntemlerin arasındaki başarımlar oranları karşılaştırılmıştır. Yöntemlere ilişkin performansların karşılaştırılmasında; en büyük aşım, yükselme süresi ve yerleşme süresi ölçüt olarak alınmıştır. Geleneksel PI modelinde, ampirik yaklaşımla PI değerleri $K_p=0.001$ ve $K_i=0.15$ olarak elde edilmiştir. PSO tabanlı PI modelinde ise katsayılar ($K_p=0.2042$, $K_i=1$) olarak belirlenmiştir. PSO için farklı parçacık sayıları ile model denenmiş ve en iyi sonucun 20 parçacıkla elde edildiği tespit edilmiştir. Son olarak PSO tabanlı FOPI uygulamasında ise PI^{λ} kontrolör katsayıları ($K_p=0.7753$, $K_i=0.3650$ ve $\lambda=0.2050$) olarak belirlenmiştir. Bulgulara göre, önerilen PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI yaklaşımları ile elde edilen performans, geleneksel PI yaklaşımı ile elde edilen performanstan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tüm (P, V, I) parametrelerde görülmüştür.</p>

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Article history:</i></p> <p>Received 10 October 2023 Received in revised form 25 October 2023 Accepted 26 November 2023 Available online 29 March 2024</p> <p><i>Keywords:</i></p> <p>Performance, PEMFC, PSO, PI controller, FOPI</p>	<p>In this study, in order to improve the performance of the Simulink PEMFC model, DC/DC (boost) controller was developed with three different applications: conventional PI, PSO-based PI and PSO-based FOPI, and the performance rates between the methods were compared. In comparing the performances of the methods; The largest overshoot, rise time and settling time were taken as criteria. In the conventional PI model, PI values were obtained as $K_p = 0.001$ and $K_i = 0.15$ with the empirical approach. In the PSO-based PI model, the coefficients are determined as ($K_p = 0.2042$, $K_i = 1$). For PSO, the model was tested with different particle numbers and it was determined that the best result was obtained with 20 particles. Finally, in the PSO-based FOPI application, PI^{λ} controller coefficients were determined as ($K_p = 0.7753$, $K_i = 0.3650$ and $\lambda = 0.2050$). According to the findings, it has been observed that the performance obtained with the proposed PSO-based PI and PSO-based FOPI approaches is better than the performance obtained with the conventional PI approach. This situation was seen in all (P, V, I) parameters.</p>

Doi: 10.24012/dumf.1373835

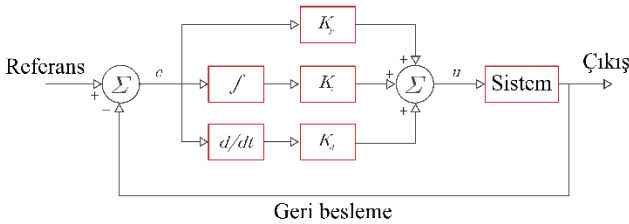
* Sorumlu Yazar

Giriş

Yakıt hücreleri, yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal bir sistemdir. Sıklıkla yakıt olarak Hidrojen'in kullanıldığı yakıt pillerinin çeşitli türleri geliştirilmektedir. Bunlardan bir tanesi Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cells) olup, tespit edilen önemli özellikleri; kompakt ve hafif oluşu, düşük sıcaklıklarda yüksek çıkış güç yoğunluğu, düşük çevresel etkisi ve iyi bir başlama/kapama performansının olmasıdır [1]. Bu avantajlar PEM'in birçok uygulamada kullanılmasının önünü açmıştır. Bu uygulamalardan bazıları; ulaşım araçlarında güç kaynağı, kompakt kojenerasyon sabit güç kaynağı, taşınabilir güç kaynağı ve acil durum yedek güç kaynağıdır. Ancak standardın altında görülen performans, sabit tutulamayan (kontROLSÜZ) gerilim ve yakıt tüketimindeki yüksek oran gibi sorunlar PEMFC'lerin ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını engelleyen parametrelerdir [2]. Dolayısıyla PEMFC'lerde uygun bir kontrol tasarımının olması gerekmektedir. Bu motivasyonla bu çalışmada, PEMFC'nin performansını iyileştirmek amacıyla geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO-FOPI kontrolörleri simulink modelleri geliştirilmiş ve yöntemlerin arasındaki başarımları karşılaştırılmıştır.

Literatürde PEM yakıt pili veya farklı sistemlerin optimizasyon sorunlarına ilişkin çalışmalar yapıldığı görülebilmektedir. Çalışmaların genelinde hedeflenen sorunların çözümü için çeşitli parametrelerin farklı optimizasyon yöntemleri ile belirlenmesi üzerinedir. Bu çerçevede literatürde görülen çeşitli örnek çalışmalar ve tespitler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Geleneksel tamsayı dereceli PID (Proportional -Integral - Derivative, Oransal – İntegral - Türevsel) kontrolör, ile sistemin uygun şekilde denetlenebilmesi, kontrolöre ait parametrelerin doğru belirlenmesi ile mümkündür (Şekil 1). Parametrelerin belirlenmesinde; PID katsayılarını deneysel olarak bulmak için geliştirilen Ziegler–Nichols yönteminin dışında, yapay zeka teknikleri de yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Ancak gerçek dünyadaki nesnelere veya kesirli işlemleri en iyi şekilde denetleme yeteneğinden yoksundur. Bunun sebebi, kontrol edilmek istenen değişkenlerin doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahip olmasıdır [2]. Bu olumsuzluklardan dolayı; daha esnek, güçlü ve kesin sonuç üreten kesir dereceli kontrolörler çalışmalarda tercih edilmektedir.



Şekil 1. PID kontrolörün genel yapısı

Kesir dereceli PID (FO-PID) kontrolör kullanarak, PEMFC'nin optimal dinamik performansı artırılabilir. Ayrıca FO-PID kontrolörün parametreleri sezgisel

optimizasyon yöntemleri ile ayarlanarak, kontrolörün kazancı optimize edilebilmektedir [4]. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm-GA), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization-ACO), Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) ve Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony - ABC) gibi sezgisel optimizasyon yaklaşımları ile optimum çözümün bulunacağı garanti edilemez ancak yöntemin yeteneği dahilinde en uygun sonuca ulaşılır.

Polinom sinir ağı tabanlı GA ile optimize edilmiş bir kontrollü bir PEMFC modellenmiştir [5]. Ancak GA ile yüksek doğruluk elde edilemediği literatürden görülebilmektedir. Diğer dezavantajları ise işlem sürecinde iterasyon sayısının oldukça fazla olması ve dolayısıyla işlem süresi açısından maliyetinin yüksek olmasıdır [6].

Karınca Kolonisi Algoritmasının teorik analizinin zor olması, ihtiyaç duyulan yakınsama süresinin belirsizliği ve olasılık dağılımının her iterasyonda değişmesi, çalışmalarda dikkate alınan önemli parametrelerdir. Diğer taraftan Gri Kurt Optimizasyon (GKO) Algoritması ise daha az güvenilir olması, düşük düzeyde hata toleransına sahip olması ve düşük hızda son derece karmaşık bir teknik olması dikkat çekmektedir. Sözü edilen optimizasyon yöntemlerinin aksine, PSO yöntemi basit, etkili ve kolay uygulanabilir olmasıyla dikkat çekmektedir.

Simulink PEMFC modelinin performans iyileştirmesi; geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI kontrolörleri ile gerçekleştirilerek bu makalede sunulmuştur. Yöntemlerin karşılaştırılmasında; en büyük aşım, yükselme süresi ve yerleşme süresi dikkate alınmıştır. Kontrolörlerin niceliksel karşılaştırması durumunda, FOPI kontrolörün kayda değer ölçüde sistem performansını iyileştirdiği görülmektedir [2].

Makalenin kalan bölümleri şöyle organize edilmiştir; materyal ve yöntem kapsamında; PEM yakıt pili, PI Kontrollü DC/DC Dönüştürücü, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), PSO-FOPI, Performans Endeksi, Çalışmada Önerilen Model konuları kısaca açıklanmıştır. Ardından Bulgular ve Sonuçların tartışılması ile makale sonlandırılmıştır.

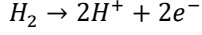
Materyal ve Yöntem

Bu bölümde PEM yakıt pili ile ilişkili simulink modeli ve performansın iyileştirilmesine yönelik kullanılan yöntemler açıklanmıştır.

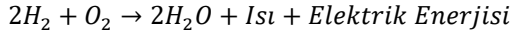
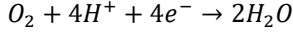
PEM Yakıt Pili

PEM yakıt hücresi, yakıt hücreleri arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olanıdır. Bu durum, yakıt hücresini oluşturan yapı ve kapsamında yer alan malzemelerin karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Yakıt pilinde meydana gelen kimyasal reaksiyon, elektroliz olayının tersi bir durumdur. PEM yakıt pilinin yapısı ve çalışma düzeneği Şekil 2'de gösterilmiş olup, biri negatif (anot) ve diğeri pozitif (katot) olmak üzere iki metal elektrot içermektedir. Şekilden görüldüğü üzere Hidrojen ve Oksijen'in sırasıyla anot ve katot girişlerini kullandıkları görülmektedir. Anot kısmında Hidrojen atomları katalizör

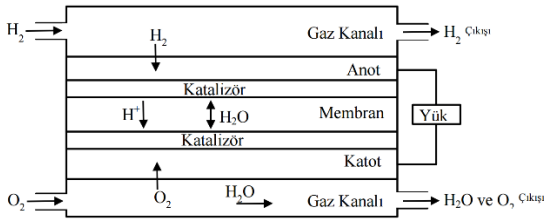
(örn. Platin içerikli bileşikler) etkisiyle protonlara ve elektronlara ayırır. PEM yakıt hücresindeki anot reaksiyonu:



Ayrılan protonlar, membran diye adlandırılan proton ileten elektrolitten geçerken, elektronların hareketi ile oluşan elektrik akımı sistem dışında yer alan elektrik devresinden geçirilir. Elektrolit arasından geçen protonlar, elektrik devresinden geçen elektronlar ile tekrar bağlanır ve oksijenle birleşerek saf su buharı ile birlikte ısı meydana getirirler [7]. PEM yakıt hücresindeki katot reaksiyonu ve toplam reaksiyonlar sırasıyla:

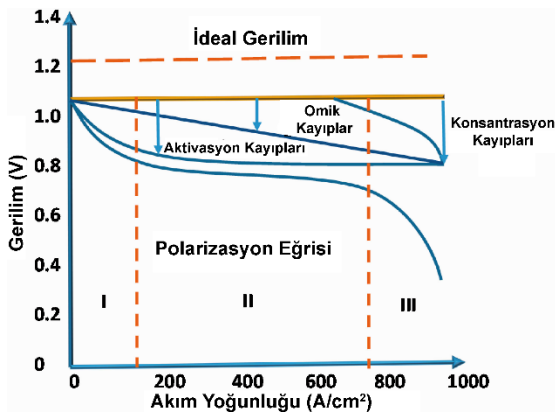


60 ile 80 °C arasındaki düşük çalışma sıcaklığında çalışabilmesi, elektrik üretim işlemine hızlı başlaması, güç talebindeki değişikliklere hızlı yanıt vermesi, donanımsal olarak hafif ve düşük hacimde olması ile birlikte yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, günümüzde olduğu gibi gelecekte de birçok alanda uygulanabileceği anlaşılmaktadır. [7].



Şekil 2. Yakıt pili yapısı ve çalışma sistemi [8]

PEM yakıt pilinin kayıp eğrisi, genellikle bir yakıt pilinin karakteristiğini ifade etmekte olup, polarizasyon eğrisi olarak adlandırılır (Şekil 3). Şekilden görüldüğü üzere hücrenin V/I değişimi doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir. Doğrusal olmayışı ise akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, membran nemliliği ve reaktant kısmi basıncı gibi faktörlere bağlıdır [9].



Şekil 3. PEM yakıt pilinin polarizasyon eğrisi [10]

PI Kontrollü DC/DC Yükseltici (Boost) Dönüştürücü

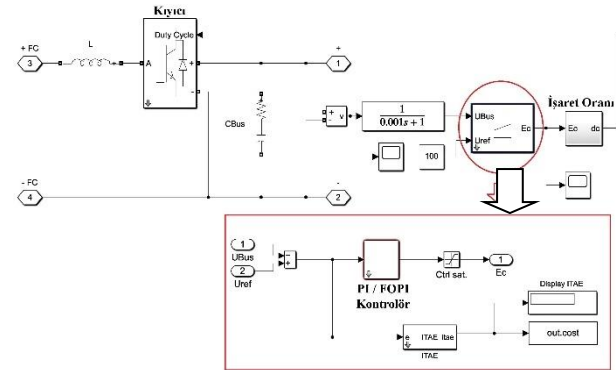
Günümüzde endüstride ihtiyaç olan elektrik enerjisini sağlayan güç kaynaklarının kararlı olması, zorunlu hale gelmiştir. Oluşan bu ihtiyacın karşılanması anahtarlamalı güç kaynakları ile mümkündür [11]. Yumuşak hız kontrolü, yüksek verim ve dinamik tepki gibi avantajları nedeniyle DC-DC dönüştürücüler tercih edilmektedir. PEMFC çıkışı gerilimi kullanılan yerlerine göre araçlarda, konut uygulamalarında güç aktarma birimleriyle yükseltilebilmektedirler [12].

Gerilimi regüle etmekle birlikte genliği düşürme (Buck) veya yükseltme (Boost) amacıyla kullanılan DC-DC dönüştürücülerde çıkış voltajının büyüklüğü, dönüştürücü anahtarının girişindeki darbenin görev oranının (Duty cycles) kontrol edilmesi ve dönüştürücü anahtarının her döngüde açılıp kapatılmasıyla kontrol edilir.

Bu çalışmada kullanılan yükseltici (Boost) DC/DC dönüştürücüler, giriş DC gerilimini daha yüksek seviyede çıkış DC gerilimine dönüştüren çeviricilerdir. Simulink PEMFC modelinin çıkışında kullanılan 100V DC/DC (ortalama değer) dönüştürücü paketinde, IGBT anahtarlama elemanı kullanılır.

DC-DC dönüştürücülerin yük değeri ya da giriş gerilimi değişse de çıkış değerlerinin sabit kalması gerekmektedir [12]. PID kontrol yöntemleri bu aşamada sıklıkla tercih edilen bir yaklaşımdır [14]. Çalışmalarda, kontrolör katsayıları ayarlanarak PID kontrolörden en iyi performansın elde edilmesi üzerine odaklanılır. Katsayıların belirlenmesi ile ilişkili literatürde bilinen en temel yöntemler ise Ziegler-Nichols, Cohen-Coon kuralları, Åström-Hägglund yöntemi ve ileri Ziegler-Nichols yöntemidir [15].

Bu çalışmada PEMFC çıkışında PI kontrollü DC-DC dönüştürücü kullanılmış olup, PI katsayıları PSO ve PSO-FOPI yöntemleri ile belirlenmiştir. Çalışmadaki dönüştürücüye ilişkin Matlab-Simulink modeli şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. PSO tabanlı PI/FOPI kontrollü DC/DC dönüştürücü simulink modeli

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

1990'ların ortalarında kuş veya balık sürülerinin yiyecek arama davranışlarının algoritmaya dönüştürülmesiyle bulunan bir yöntem olup, Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilmiştir [16]. PSO yönteminin en önemli avantajı

karmaşık sistemlerin çözümü için basit bir yöntem olmasıdır.

PSO yönteminde, sürünün her bireyi çözüm uzayında dolaştığı ve optimizasyon probleminde her parçacığın bir çözüm adayı olduğu kabul edilir. Parçacığın pozisyonu (konumu) iki parametreye dayanır. Bu parametreler; kendisinin lokalde daha önce ziyaret ettiği en iyi (p_{best}) konum ve sürüde ziyaret edilen en iyi (g_{best}) konum parametresidir. Her bir parçacığın performansı belirlenen maliyet (fitness) fonksiyonu ile hesaplanır.

Bir parçacığın konum (s_i^k) ve hız (v_i^k) denklemleri sırasıyla (1) ve (2) nolu denklemlerde belirtildiği şekilde hesaplanır [17].

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 rand_1 \cdot (p_{best_i} - s_i^k) \quad (1)$$

$$+ c_2 rand_2 \cdot (g_{best} - s_i^k)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (2)$$

Denklemlerde yer alan $rand_1$ ve $rand_2$ [0, 1] aralığında seçilmiş rastgele sayılar olup, w terimi atalet ağırlığını ifade etmektedir. c_1 ve c_2 ise ivmelenme sabitleridir. Ayrıca denklemde yer alan s_i^{k+1} ve s_i^k terimleri sırasıyla geçerli konumu ve yeni parçacık konumunu ifade eder.

Parçacığın hesaplanan hız değeri, kontrol edilemeyen osilasyonlara girmemesi amacıyla belirli sınırlar arasında tutulması sağlanır. Bu aşamada denklem (3) kullanılır.

$$v^{max} = (x^{max} - x^{min})(10\% \sim 20\%) \quad (3)$$

$$v^{min} = -v^{max}$$

Bu çalışmada hem klasik PI ve hem de kesir dereceli PI parametre değerleri, PSO yöntemi ile belirlenmiştir.

PSO-FOPI

Pudlobny tarafından ilk kez uygulanan kesir dereceli PID ($PI^\lambda D^\mu$) kontrolörün [18], son yıllarda lineer olmayan sistemlerin denetiminde yüksek performans sergilediği görülebilmektedir [19,20]. $PI^\lambda D^\mu$ kontrolörün, kontrol sistemleri için daha iyi performans ve kararlılık sağladığı [20] nolu referansta belirtilmiştir. Klasik PID yönteminin $PI^\lambda D^\mu$ tipi kesir dereceli yöntemle göre farkı; kesir dereceli kontrolörde, türev ve integral derecesi herhangi bir reel sayı olabilir [18]. $PI^\lambda D^\mu$ kontrolör yaygın olarak denklem (4) de gösterildiği şekilde ifade edilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^\mu e(t) \quad (4)$$

İfadenin Laplace dönüşümü ile elde edilecek transfer fonksiyonu denklem (5)'de verilmiştir.

$$G(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu \quad (5)$$

Burada $\lambda, \mu \in R$ ve $\lambda, \mu \geq 0$ olup, sırasıyla türev ve integral terimlerinin kesir derecesini ifade eder. Kontrolörün katsayıları olan K_p, K_i ve K_d terimleri sırasıyla oransal, integral ve türev kazancını ifade eder.

$PI^\lambda D^\mu$ kontrolör tasarlamak için gerekli parametre sayısı 5 (K_p, K_i, K_d, λ ve μ) olup, parametrelerin belirlenmesi konusunda literatürde farklı yöntemler önerilmektedir. Bu yöntemlerden biride parçacık sürü optimizasyonuna (PSO) yöntemine dayalı hesaplama yöntemidir. Klasik PSO

yönteminde, c_1 değeri parçacığı en iyi pozisyona çekerken c_2 değeri sürüyü küresel en iyi konuma çeker. Dolayısıyla PSO-FOPI yönteminde, c_1 ve c_2 değerleri 4 farklı durum (keşif, yararlı, yakınsama ve dışlama durumları) için farklı değerler alır. Söz konusu durumlar kapsamında, c_1 ve c_2 için izlenen yaklaşımlar Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. PSO-FOPI'de farklı durumlarda c 'ler için izlenen yaklaşım [22]

Durum	İzlenen strateji
Keşif durumu	c_1 artırılır, c_2 azaltılır
Yararlı durumu	c_1 biraz artırılır, c_2 biraz azaltılır
Yakınsama durumu	c_1 ve c_2 biraz artırılır
Dışlama durumu	c_1 azaltılır, c_2 artırılır

Bu çalışmada PI^λ kontrolörün parametreleri PSO-FOPI yöntemi ile optimize edilmiştir.

Performans Endeksi (Maliyet)

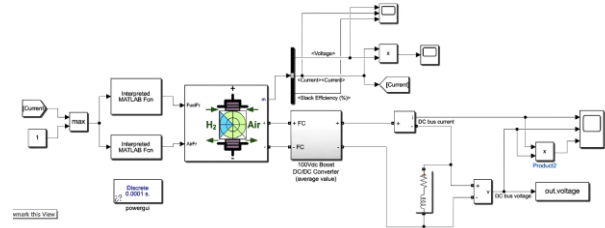
Bu çalışmada optimum değerlerin tespiti için PSO yöntemi kullanılmış ve optimum çözüm için performans endeksi kullanılmıştır. İntegral Zaman Mutlak Hata (Integral Time Absolute Error - ITAE) fonksiyonu, performans endeksi olarak kullanılmış olup, denklem (6) da belirtildiği şekilde tanımlanır.

$$ITEA = \int_0^\infty t|e(t)|dt \quad (6)$$

Her iterasyonda oluşan hatanın genliği ITEA ile belirlenmiş ve optimum parametreler için minimum ITEA hata değeri aranmıştır. Hata değeri çalışmada maliyet olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada Önerilen Model

PEMFC'nin performans iyileştirmesi geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO-FOPI kontrolörleri ile gerçekleştirilerek bu makalede sunulmuştur. Çalışmada kullanılan Matlab simulink paketi Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği üzere PEMFC çıkışına DC/DC dönüştürücü bağlanmıştır. DC/DC dönüştürücünün kapsamı şekil 4'te gösterilmiştir.



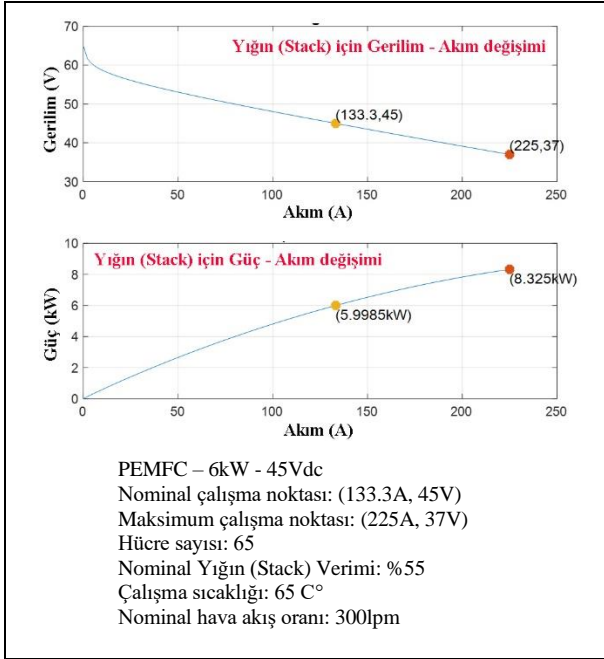
Şekil 5. Çalışmada kullanılan simulink paketi

Şekil 4'te gösterilen PEMFC modeline ilişkin parametre değerleri ve V/I karakteristiği şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 4'de görüldüğü üzere, Hidrojen tüketimi [L/dak] ve oksijen hava akışı [m³/s] giriş olarak alınmıştır. Yakıt pilinin çıkışında elde edilen DC gerilim değeri DC/DC dönüştürücü girişine uygulanmıştır. DC/DC dönüştürücü için belirlenen simulink modeli şekil 4'de gösterilmiştir.

Bir yakıt hücresinde %70 ile %80 aralığında bir yük ile yüklendiğinde maksimum verimlilik elde edilir. [23]. Bu

çalışmada, 6 kW'lık yakıt pili kullanılmış ve sistem yükü %75 yüklenme oranı ile 4.5 kW seçilmiştir. Çalışmada sabit bir RL yükü kullanılmış olup, empedans değerleri $Z_R=4.5k\Omega$ ve $Z_L=4500\Omega$ olarak belirlenmiştir.



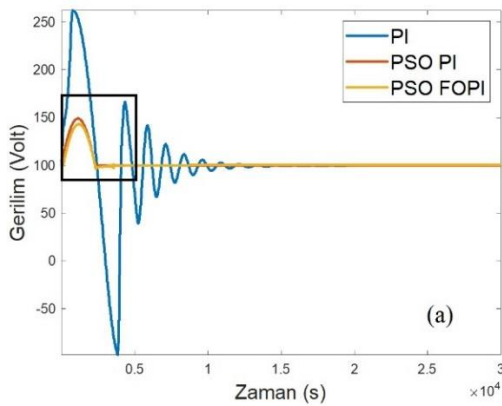
Şekil 6. Çalışmada kullanılan Simulink PEMFC model parametreleri ve V/I karakteristiği

Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Simulink PEMFC modelinin performansını iyileştirmek amacıyla geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI olmak üzere 3 farklı uygulama geliştirilmiş ve yöntemlerin arasındaki başarımları karşılaştırılmıştır. Bu bölümde yapılan uygulamaların bulguları verilmiştir.

Geleneksel PI Modeli: Birinci uygulamada geleneksel uygulama olan ampirik yaklaşımla PI değerleri $K_p=0.001$ ve $K_i=0.15$ olacak şekilde elde edilmiştir.

PSO tabanlı PI Modeli: İkinci uygulamada, (K_p , K_i) olan PI katsayıları PSO yöntemi ile belirlenmiştir. PSO için farklı parçacık sayıları ile model denenmiş ve en iyi sonucun 20 parçacıkla elde edildiği tespit edilmiştir.



İterasyon sayısı 100 alınmış ve her iki parametre için denemeler neticesinde (0, 1) değer aralığında çözüm aranmıştır. Diğer parametre değerleri; $w=0.9$, $c_1=1.2$ ve $c_2=1.2$ olarak alınmıştır.

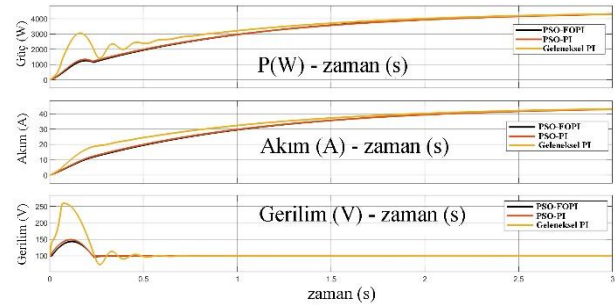
PSO tabanlı FOPI Modeli: Üçüncü uygulamada ise DC/DC dönüştürücü, kesir dereceli PI^λ kontrolörü ile denetlenmiş ve kontrolörün parametreleri PSO ile belirlenmiştir. Bir önceki PSO uygulamasında kullanılan parametre değerleri burada da tekrar edilmiştir. Sadece bu uygulamada 2 değil, (K_p , K_i ve λ) olmak üzere 3 parametre değeri belirlenmiştir.

Her üç modelin çalıştırılması ile elde edilen optimum PI katsayıları ve ilişkili maliyet değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

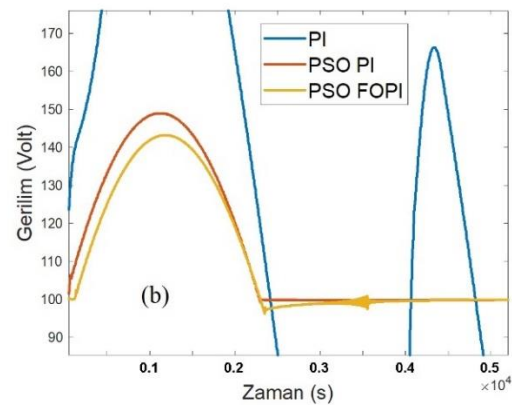
Tablo 2. PI katsayıları ve ilişkili maliyet değerleri

	K_p	K_i	λ	Maliyet
PI	0.001	0.15	---	---
PSO-PI	0.2042	1	---	89.6159
PSO-FOPI	0.7753	0.3650	0.2050	0.8099

PEMFC'nin performans iyileştirmesi geleneksel PI, PSO tabanlı PI (PSO-PI) ve PSO-FOPI kontrolörleri ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen optimum katsayılar ile sistem çıkışında gözlemlenen değişimler Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da sırasıyla güç, akım ve gerilim değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 7. Geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO-FOPI kontrolörleri ile sistem çıkışında görülen güç, akım ve gerilim değişimleri.



Şekil 8. (a) Geleneksel PI, PSO-PI ve PSO-FOPI kontrolörleri ile elde edilen çıkış gerilim değişimleri
 (b) Başlangıç aşamasında görülen gerilim değişimleri

Şekil 7’de yer alan gerilim değişiminin detayı, şekil 8(a) ve (b)’de gösterilmiştir.

Bulgular incelendiğinde elde edilen çıkarımlar aşağıda listelenmiştir.

- Önerilen PSO-PI ve PSO-FOPI yaklaşımları ile elde performans, geleneksel PI yaklaşımı ile elde edilen performanstan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tüm (P, V, I) parametrelerde görülebilmektedir.
- Yöntemlere ilişkin performansların karşılaştırılmasında; en büyük aşım, yükselme süresi ve yerleşme süresi ölçüt olarak alınmıştır. Söz konusu ölçütlere göre tespitin çıkış gerilimi (Şekil 7) üzerinden yapılabileceği görülmektedir. Tüm ölçütlerde, PSO-PI ve PSO-FOPI yaklaşımlarının geleneksel PI modeline göre daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiştir.
- En büyük aşım ölçütü dikkate alındığında, PSO-FOPI yaklaşımının PSO-PI yaklaşımına göre biraz daha iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, Simulink PEMFC modelinin performansını iyileştirmek amacıyla geleneksel PI, PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI olmak üzere 3 farklı uygulama ile yükseltici DC/DC (boost) kontrolör geliştirilmiş ve yöntemlerin arasındaki başarımlar karşılaştırılmıştır. Yöntemlere ilişkin performansların karşılaştırılmasında; en büyük aşım, yükselme süresi ve yerleşme süresi ölçüt olarak alınmıştır. Geleneksel PI modelinde, ampirik yaklaşımla PI değerleri $K_p=0.001$ ve $K_i=0.15$ olarak elde edilmiştir. PSO tabanlı PI modelinde ise katsayılar ($K_p=0.2042$, $K_i=1$) olarak belirlenmiştir. PSO için farklı parçacık sayıları ile model denenmiş ve en iyi sonucun 20 parçacıkla elde edildiği tespit edilmiştir. Son olarak PSO tabanlı FOPI uygulamasında ise PI^{λ} kontrolör katsayıları ($K_p=0.7753$, $K_i=0.3650$ ve $\lambda=0.2050$) olarak belirlenmiştir. Bulgulara göre, önerilen PSO tabanlı PI ve PSO tabanlı FOPI yaklaşımları ile elde edilen performans, geleneksel PI yaklaşımı ile elde edilen performanstan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, tüm (P, V, I) parametrelerde görülmüştür.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Yazar makaleyi tasarladı, literatür taraması yaptı, deneysel çalışmalar ve analizler yaptı, sonuçları tartıştı ve makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] F. Laurencelle, R. Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T.K. Bose, “Characterization of a Ballard MK5-E proton exchange membrane fuel cell stack”. *Fuel Cells J* pp. 66-71,2001, DOI: 10.58559/ijes.1264797
- [2] S. Singh, V. K.1 Tayal, H.P Singh, V.K. Yadav, “Dynamic Performance Enhancement of PEM Fuel Cell Using PSO Optimized Fractional Order PI Controller”, *Suranaree J. Sci. Technol.* pp. 1-9 Vol. 29 No. 6; November - December 2022
- [3] Yi Zhou, "A Summary of PID Control Algorithms Based on AI-Enabled Embedded Systems", *Security and Communication Networks*, vol. 2022, Article ID 7156713, 7 pages, 2022.
- [4] Z. Qi, J. Tang, J. Pei, L. Shan, “Fractional controller design of a DC-DC converter for PEMFC”. *IEEE Access*. 2020,8:120,134-120,144 DOI:10.1109
- [5] M. Mehrabi, S. Rezazadeh, M. Sharifpur, J. Meyer, “Modeling of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) performance by using genetic algorithm polynomial neural network (Ga-Pnn) hybrid system”. *In: Proceedings of the ASME 2012 10th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference Fuel Cell.*, p. 447-452.
- [6] O.I. Khalaf, G.M. Abdulsahib, B.M. Sabbar, “Optimization of wireless sensor network coverage using the bee algorithm”. *J. Inform. Sci. Eng.*, 2020, 36:377-386.
- [7] Kraytsberg, A., Ein-Eli, Y. “Review of Advanced Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cells,” *Energy and Fuels*, 2014, 28(12), 7303–30.
- [8] Ural, Z., “Yakıt Pilleri ve Bir PEM Yakıt Pili Sisteminin Dinamik Benzetimi”, Y. Lisans Tezi, Dicle Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, 2007.
- [9] J.H. Hirschenhofer, “Fuel Cell Status: 1996”, *IEEEAES Systems Magazine*, March 1997, pp. 23-28
- [10] IH. Gilani, M. Amjad, SS. Khan, “PEMFC application through coal gasification along with cost-benefit analysis: A case study for South Africa”. *Energy Exploration & Exploitation*. 2021, 39(5):1551-1587. DOI:10.1177/014459872199972
- [11] DW. Hart, “*Power Electronics*”, 1sd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2010, pp.196-264.
- [12] A. Bilhan, Yakıt Pili Uygulamaları için Kademeli Yükseltici DA/DA Dönüştürücü Devresinin Tasarımı, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 11, sayı. 1, ss. 29-37, Mar. 2020, doi:10.24012/dumf.527601
- [13] H. Guldemir, “Study of Sliding Mode Control of DC-DC Buck Converter”, *Energy Power Eng.*, vol 3, issue 4, pp. 401-406, 2011.
- [14] M. Hong-bo, F. Quan-yuan, “Optimized PID Controller Design for Buck DC-DC Switching Converters”, *Sch. Inf. Sci. Technol. Jiaotong Univ.*, 2008, vol 12, issue 6, pp. 640-643.
- [15] M. Zhuang, DP.Atherton, “Automatic tuning of optimum PID”, *IEE Proceedings D – Control Theory and Applications*, 1993, 140(3), 216-224.

- [16] J. Kennedy, R.C. Eberhart, "Particle swarm optimization", *IEEE IJCNN*, 4, 1995, 1942–1948.
- [17] Y. Shi, R.C. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer", *Proceeding of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1998, 69-73.
- [18] I. Podlubny, "Fractional-Order Systems and – Controllers," *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1999, Cilt:44, No:1.
- [19] F. Padula, A. Visioli, "Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers," *Journal of Process Control*, 2011, Cilt: 21, No:1, s:69-81.
- [20] Y. Luo, Y.Q. Chen, C.Y. Wang, Y.G. Pi, "Tuning fractional order proportional integral controllers for fractional order systems," *Journal of Process Control*, 2010, Cilt:20 No: 7, s:823–831,
- [21] I. Petras, "Control Quality Enhancement by Fractional Order Controllers", *Acta Montanistica Slovaca*, 1998, Vol. 3, No 2, 143-148.
- [22] A. Özkan, T. Mustafa, T. Remzi, "Kesir Dereceli Denetleyici Parametrelerinin Bulanık Adaptif Parçacık Sürü Optimizasyon Yöntemi ile Belirlenmesi", Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi (TOK) 2012 Ulusal Toplantısı , Niğde, Turkey, pp.445-450, 2012
- [23] S. Celik, M. Alkan, "Katı oksit yakıt pilinde yakıt kullanım veriminin deneysel olarak incelenmesi", in Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 2018, pp.966-978